

结构中基底橡胶隔震支座非线性特性的无模型识别

雷 鹰¹, 何明煜¹, 林树枝²

(1. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 厦门 361005; 2. 厦门市建设与管理局, 厦门 361001)

摘要: 基底隔震建筑结构的抗震性能高度依赖于橡胶支座隔震系统的非线性特性。提出一种基于数据的方法, 仅利用量测现役结构的部分加速度动力响应和作用在结构基底的激励, 在不需要橡胶支座隔震系统数学模型的情况下, 识别出橡胶支座隔震系统的非线性特性。首先, 在微弱基底激励作用下, 基于扩展卡尔曼预测估计算法识别出结构的物理参数, 包括橡胶支座的线性刚度和阻尼。然后, 在强基底激励作用下, 将橡胶支座出现的非线性视为作用于结构的“附加未知虚拟外力”, 通过依次对结构响应进行卡尔曼预测估计和对“附加未知虚拟外力”的最小二乘识别, 可以识别橡胶支座的非线性力。数值算例结果表明, 提出的方法可以识别出橡胶支座的非线性特性, 并具有良好的精度。

关键词: 基础隔震; 非线性; 无模型; 系统识别; 扩展卡尔曼预测; 卡尔曼预测; 最小二乘法

中图分类号: TU312.3 文献标识码: A

Model-free identification for nonlinear properties of rubber-bearings in base-isolated buildings

LEI Ying¹, HE Ming-yu¹, LIN Shu-zhi²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Xiamen Construction and Management Bureau, Xiamen 360002, China)

Abstract: Aseismic behavior of base-isolated structures is highly dependent on nonlinear properties of their rubber-bearing isolated system. Here, a data-based method using only partial measurements of structural dynamic response and excitation was proposed to identify the nonlinear property of the rubber-bearing isolated system without its mathematical model. Firstly, structural parameters including the linear stiffness and damping of the rubber-bearing under a minor earthquake were identified based on the extended Kalman estimator approach. Then, the nonlinear effect of the rubber-bearing was treated as an additional unknown fictitious loading exerted on the building under a severe earthquake. With sequential application of Kalman estimator method in the structural responses and the least-square estimation of the additional unknown fictitious loading, the nonlinear property of the rubber-bearing was identified. Numerical simulation results demonstrated that the proposed method is capable of identifying nonlinear property of a rubber-bearing isolated system with good accuracy.

Key words: base-isolation; nonlinearity; model-free; system identification; extended kalman estimator; kalman estimator; least-squares estimation

基础隔震是工程结构地震反应控制中发展得较早且有效的理论和技术, 它是通过在结构底部设置柔性隔震层, 使最为延性部件产生横向位移, 由于隔震层的水平刚度小, 阻止了水平地面运动传递到上部结构; 同时利用隔震层的滞回变形耗散能量, 使上部结构免遭破坏^[1-3]。在众多隔震技术中, 橡胶支座隔震技术是最成熟、应用最广泛的一种。典型的橡胶隔震支座的

力-位移关系是非线性的^[4], 对于基础隔震结构抗震性能的准确预测高度依赖于橡胶支座非线性特性的精确识别。现有的橡胶隔震支座非线性特性识别的方法大多数都是基于假定的橡胶支座的非线性数学模型, 有些描述橡胶支座动力行为的迟滞模型在前人的文献中已有提及^[4-6]。但是, 由于橡胶支座非线性材料的复杂性以及实验中有限的有效数据, 建立一个橡胶支座隔振系统的准确的非线性数学模型仍然比较困难。因此, 发展基于数据的、无数学模型的识别方法, 用于识别橡胶隔震支座的非线性特性很有必要。

然而, 对于不需要数学模型的非线性系统识别的理论建立的相对较少。Masri 等^[7-8]提出了以系统位

基金项目: 国家自然科学基金课题(51178406); 同济大学土木工程防灾

国家重点实验室开放课题(SLDRCE10-MB-01)资助

收稿日期: 2012-07-10 修改稿收到日期: 2012-10-24

第一作者 雷 鹰 男, 博士, 教授, 1966年5月生

移和速度为坐标 构造非线性系统恢复力曲面,解决了单自由度动力系统的非线性参数识别问题。并将该方法应用于解决链状多自由度非线性动力系统的识别问题。针对非线性多自由度系统, Masri 等^[9-10] 基于模态转换的思想,提出了完全基于结构动力响应数据测量的非线性多自由度系统的非参数化降阶模型。运用最小二乘拟合优化算法, Toussi 等^[11] 识别了高层结构层间力与位移随时间变化的滞回特性。基于单个激励和响应时程,结合最小二乘拟合算法, Mohammad 等^[12] 提出一种直接使用时域响应测量的线性或非线性的物理参数识别方法; 倪一清等^[13] 利用迟滞恢复力与结构响应的多值关系,通过 Duhem 变换得到恢复性信息。Xu 等^[14-15] 在荷载和结构响应进行观测的情况下,基于最小二乘进行非线性识别。但这些方法需要对结构的加速度、速度和位移响应进行全部观测。此外,也有学者探讨将分形理论、神经网络、遗传算法以及 Hilbert-Huang 变换(HHT) 等方法用于未知模型的非线性系统的识别^[16-17],但这些方法存在本身较繁琐以及基于经验等问题。

以往对于橡胶支座的识别或者实验研究都是将它脱离整个建筑结构而单独进行^[4],缺乏对现役建筑结构使用的隔震橡胶支座的非线性特性识别的研究。由于长时间材料老化及损伤等因素,在现役结构中使用的橡胶支座特性与其使用前的试验结果会发生较大的变化。在结构上放置数量众多的各种传感器来观测结构的所有响应是不现实的,在实际应用中很难实现。也有学者研究过关于部分观测输入下已知非线性模型的结构参数的识别方法^[18-20],但是这些方法都同时需要结构位移、速度、加速度的所有输出信息。事实上,通常只有有限的加速度传感器布置在某些自由度上来观测结构某些点的加速度响应。因此,研究能够在部分观测的加速度响应下的非线性系统识别方法是非常必要的。

本文提出了一种基于观测的结构加速度响应数据进行橡胶支座的非线性特性无模型识别方法。以隔震层和上部结构作为一个整体,将橡胶支座所产生的非线性看成是结构受到一个附加的虚拟力。该方法采用扩展卡尔曼识别结构参数,用最小二乘法估计附加虚拟力。首先,在微弱基底激励作用下,基于扩展卡尔曼预测方法识别出结构物理参数,包括橡胶支座的线性刚度和阻尼。然后,在强基底激励作用下,将橡胶支座出现的非线性视为作用于结构的“附加未知虚拟外力”通过依次对结构响应进行卡尔曼预测估计和对“未知附加虚拟外力”的最小二乘识别,可以识别橡胶支座的非线性力。通过一个 6 层基础隔震的剪切框架的数值算例,对所提出方法的有效性进行验证。

1 识别算法

考虑一个带有基底橡胶隔震支座的 n 层剪切框架受到地震作用,如图 1 所示。

各楼层结构相对于地面的运动方程可以写成如下形式:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + Bf_{nb} = -M\ddot{x}_g \quad (1)$$

其中: x 、 \dot{x} 和 \ddot{x} 分别表示结构相对于地面的位移、速度和加速度列向量。 M 、 C 、 K 分别表示结构的质量、阻尼和刚度矩阵。 $B = [1 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0]^T$ 是一个 $n+1$ 阶的列向量,表示隔震支座位于结构的底层, I 是单位列向量, f_{nb} 表示橡胶隔震支座的非线性迟滞力。

通常,可以在结构上安装若干加速度传感器,用于量测结构的加速度响应。本文提出一种基于有限加速度响应识别橡胶支座非线性迟滞力的方法。

1.1 线性系统的参数识别

当结构受到较弱的地震作用时,基底橡胶隔震支座还处于线性状态。此时非线性迟滞力 f_{nb} 为零,于是,方程(1)可以写成如下的线性形式:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\ddot{x}_g \quad (2)$$

定义结构的扩展状态向量如下:

$$X = [X_1^T \ X_2^T \ X_3^T \ X_4^T]^T \quad (3)$$

其中: $X_1 = x$, $X_2 = \dot{x}$, $X_3 = [k_b \ k_1 \ \dots \ k_n]^T$, $X_4 = [c_b \ c_1 \ \dots \ c_n]^T$

结构的扩展状态方程写成如下形式:

$$X = \begin{cases} X_2 \\ -M^{-1}(CX_2 + CX_1) - I\ddot{x}_g \\ 0 \\ 0 \end{cases} = g(X, \ddot{x}_g) \quad (4)$$

通常,结构上安装的加速度传感器是有限的,于是观测方程可以写成如下形式:

$$Y(k) = D\dot{X}_2(k) + v(k) \quad (5)$$

其中: $Y(k)$ 是时刻 $t = k\Delta t$ 观测的加速度向量(Δt 是采样时间步长), D 是加速度传感器的位置矩阵, $v(k)$ 是观测时的噪声向量,假定 v 是均值为零的高斯白噪声,且有协方差矩阵 $E[v_i v_j^T] = R_i \delta_{ij}$ (δ_{ij} 是 Kronecker 算子)。

方程(5)显示观测向量是扩展状态向量的非线性方程。因此,离散的观测向量可以写成如下的非线性方程:

$$Y(k) = h\{X(k), \ddot{x}_g(k)\} \quad (6)$$

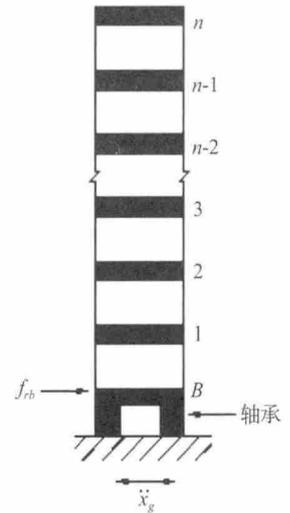


图1 带有基底橡胶隔震支座剪切框架
Fig. 1 A n-storey shear building with base isolation

根据扩展的卡尔曼滤波预测估计,在 $t = (k + 1) \Delta t$ 状态预测为:

$$\tilde{X}(k + 1 | k) = \hat{X}(k | k - 1) + \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} g(\hat{X}(t | k - 1), \ddot{x}_g(t)) dt \quad (7)$$

状态估计为:

$$\hat{X}(k + 1 | k) = \tilde{X}(k + 1 | k) + K(k) [Y(k) - h\{\hat{X}(k | k - 1), \ddot{x}_g(k)\}] \quad (8)$$

其中: 最优增益矩阵 K 为:

$$K(k) = \phi(k) P(k) H^T(k) [H(k) P(k) H^T(k) + R(k)]^{-1} \quad (9)$$

式中: P 为估计误差协方差方程:

$$P(k + 1) = \phi(k) P(k) \phi^T(k) - K(k) H(k) P(k) \phi^T(k) + Q(k) \quad (10)$$

式中: R 为观测噪声 v 的协方差矩阵;

$$\phi(k) = I + \Delta t A(k) \quad (11)$$

$$A(k) = \left. \frac{\partial g(X, \ddot{x}_g)}{\partial X} \right|_{X=\hat{X}(k|k-1); \ddot{x}_g=\ddot{x}_g(k)} \quad (12)$$

$$H(k) = \left. \frac{\partial h(X, \ddot{x}_g)}{\partial X} \right|_{X=\hat{X}(k|k-1); \ddot{x}_g=\ddot{x}_g(k)} \quad (13)$$

式(12)和(13)中的矢量求导,得到矩阵第 (i, j) 个元素为矢量的第 i 个分量关于第 j 个变量 X_i 的求导。

这样,仅利用量测的结构的部分加速度动力响应和作用在结构基底的激励,可以基于上述扩展卡尔曼预测估计公式,识别出结构包括橡胶支座的刚度 k_b, k_1, \dots, k_n 和阻尼 c_b, c_1, \dots, c_n 。

1.2 非线性系统的识别

当结构受到较强的地震作用时,橡胶支座进入非线性状态,此时 f_{nb} 不为零。本文提出将非线性迟滞力 f_{nb} 视为是作用于相应线性结构的“未知附加虚拟外力”。于是,方程(1)可以改写成如下形式:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\ddot{x}_g + Bf^* \quad (14)$$

其中 f^* 是作用于线性结构的“附加未知虚拟外力”。

由于相应的线性结构的物理参数已经在 1.1 节中识别出来,结构相应的状态向量 $X' = [X_1^T, X_2^T]^T$ 可以通过卡尔曼估计得到,具体公式类似上述扩展卡尔曼预测估计公式,只是由于有“附加未知虚拟外力” f^* ,因而无法单独用卡尔曼预测估计。本文提出基于 $t = (k + 1) \cdot \Delta t$ 时刻状态向量的估计值,由观测方程(6),利用最小二乘,对 $t = (k + 1) \Delta t$ 时刻的未知激励 $f^*(k + 1)$ 进行如下估计:

$$f^*(k + 1) = [G^T G]^{-1} G^T [Y(k + 1) - h\{\hat{X}(k + 1 | k), \ddot{x}_g(k + 1)\}] \quad (15)$$

其中: $G = M^{-1} B$ 。

于是,在识别出结构响应和“未知附加虚拟外力”

情况下,便可以画出橡胶隔震支座的非线性特性,即非线性迟滞力关于底层位移的特性曲线。

对比其他基于经典卡尔曼滤波的方法^[15-16],本文提出的基于卡尔曼预测的技术,用 $t = k\Delta t$ 时刻的扩展状态向量来估计 $t = (k + 1) \Delta t$ 时刻的扩展状态向量,而无需未知的外部激励 f^* 在 $t = (k + 1) \Delta t$ 的信息。这是该方法优于其他基于经典卡尔曼滤波方法的地方,可以简便地进行未知外力作用下的卡尔曼预测。

2 数值算例

为了验证所提出的算法的有效性,选取了一个基底带有橡胶支座隔震的 6 层剪切框架进行数值模拟。结构包括橡胶支座在内的物理参数为:

$$m_b = 500 \text{ kg}, m_1 = m_2 = \dots = m_6 = 500 \text{ kg}, k_b = 2.0 \times 10^5 \text{ N/m}, k_1 = k_2 = \dots = k_6 = 2.4 \times 10^5 \text{ N/m}, c_b = 50 \text{ N} \cdot \text{s/m}, c_1 = c_2 = \dots = c_6 = 100 \text{ N} \cdot \text{s/m}.$$

2.1 线性结构系统的识别

在弱震作用下,运用 1.1 中方法,识别线性结构的物理参数。在算例中,6 层剪切框架结构只安装了 4 个加速度传感器,第 2 层和第 4 层均未放置传感器。弱震激励采用白噪声模拟。同时,为了检验本方法的抗噪性,在量测的加速度信号中加入了 5% 的量测噪声。线性结构的物理参数的识别结果,及其与真实值的对比如表 1。隔震层的速度和位移对比如图 2 和图 3 所示。

表 1 线性结构的参数识别

Tab. 1 Identified parameters of the linear structure

楼层编号	$k_i \times 10^5 / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$		$c_i / (\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	
	真实值	识别值	真实值	识别值
b	2.0	1.992	50	44.081
1	2.4	2.406	100	90.309
2	2.4	2.401	100	93.502
3	2.4	2.408	100	92.875
4	2.4	2.401	100	93.965
5	2.4	2.408	100	93.357
6	2.4	2.391	100	98.223

从表 1 可以看出,提出的方法能很好地识别出线性结构的刚度和阻尼等物理参数。从图 2 和图 3 可以看出,提出的方法能准确地识别出系统的状态向量(位移和速度)。同时表明了提出的方法有较好的抗噪性。

2.2 非线性系统的识别

当结构受到较强震作用时,基础橡胶支座进入非线性状态。在本算例中,橡胶支座的非线性模型采用常用的 Bouc-Wen 模型^[4,17],该模型的非线性迟滞力可以用如下的公式表示:

$$F_{sb} = \alpha k_b x_b + (1 - \alpha) k_b v_b \quad (16)$$

$$\dot{v}_b = \dot{x}_b - \beta |\dot{x}_b| |v_b|^{n-1} v_b - \gamma \dot{x}_b |v_b|^n \quad (17)$$

其中非线性参数取为: $\beta=2\ 000$, $\gamma=1\ 000$, $a=0.2$, $n=2$ 。需要特别说明的是: Bouc-Wen 非线性模型仅仅用在数值模拟的计算结构响应时使用, 得到结构加速度响应后, 在识别问题时并未用到; 本文提出的方法是仅用量测的现役结构的部分加速度动力响应, 在不需橡胶支座隔震系统数学模型的情况下, 识别出橡胶支座隔震系统的非线性特性。

基于 2.2 中提到的算法以及上一步已经识别得到

的结构参数, “附加未知虚拟外力” f^* 可以通过最小二乘估计求得。于是, 橡胶支座全部的非线性迟滞力 f_n 便可以得到。即:

$$f_n = -f^* + k_b x_b \quad (18)$$

在本算例中, 强震激励仍采用强度大的白噪声模拟。同时, 为了检验本方法的抗噪性, 在量测的加速度信号中加入了 5% 的量测噪声。识别的结果如图 4、图 5 和图 6 所示。

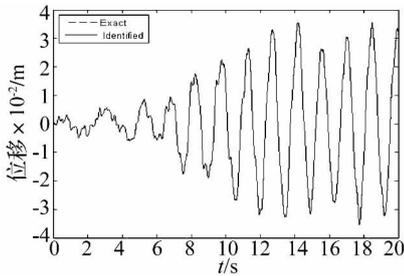


图 2 隔震层位移对比
Fig. 2 The comparison of the displacement response

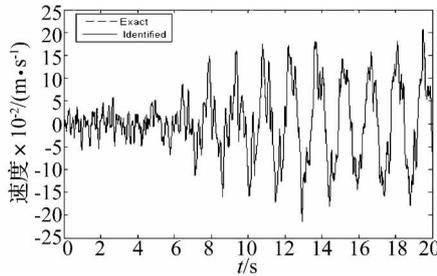


图 3 隔震层速度对比
Fig. 3 The comparison of the displacement response

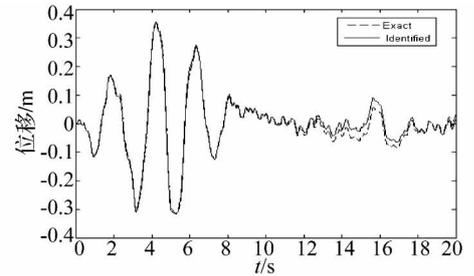


图 4 隔震层速度对比
Fig. 4 The comparison of the displacement response

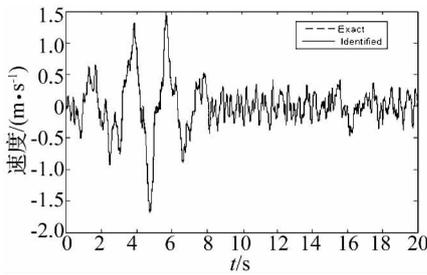


图 5 隔震层速度对比
Fig. 5 The comparison of the displacement response

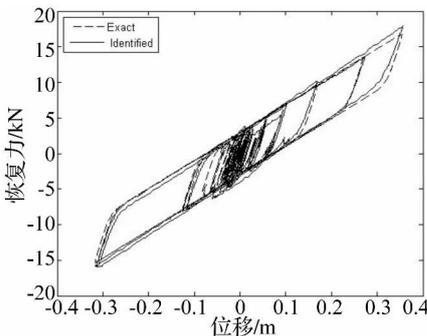


图 6 隔震层非线性力对比
Fig. 6 The comparison of the restoring force

从图 4、图 5 和图 6 的识别结果可知, 提出的方法可很好地估计出非线性结构的状态向量(位移和速度), 以及基础橡胶支座隔震层的非线性迟滞力, 并且具有很好的精度。同时表明, 提出的方法有较好的抗噪性。

3 结论

(1) 本文提出了一种在部分观测结构加速度响应情况下, 基于数据进行结构基础橡胶隔震非线性特性的无模型识别方法。该方法能有效地克服对橡胶隔震

支座非线性进行准确地数学建模的困难; 同时将隔震层同上部结构作为一个整体进行识别, 有效解决现役结构中橡胶支座的非线性特性识别的难题。数值算例结果表明, 提出的方法可以识别出橡胶支座的非线性特性, 并具有良好的精度。因此, 本文提出的方法不仅具有理论价值, 并且有很好的工程应用前景。

(2) 本文未考虑部分观测传感器多少与分布等因素对识别结果的影响等问题, 观测传感器的优化, 值得今后进行研究。另外, 本文假定上部结构在基底橡胶隔震作用下处于线性状态。对于上部结构出现非线性行为的情况, 可将本文提出的方法进行推广, 将结构的非线性行为也视为作用于相应线性结构的“附加未知虚拟外力”, 与橡胶隔震的非线性一起耦合分析, 这也值得进一步研究。

参考文献

[1] Housner G W, Bergman L A, Caughey T K, et al. Structural control: past, present, and future [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(9): 897-971.
 [2] 杜永峰, 林治丹, 李慧. 橡胶支座与柱串联体系的动力特性分析 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(17): 134-139.
 DU Yong-feng, LIN Zhi-dan, LI Hui. Dynamic characteristics of rubber bearings serially connected with columns [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(17): 134-139.
 [3] 陈鑫, 李爱群, 左晓宝, 等. 新型形状记忆合金隔震支座设计与分析 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(6): 256-260.
 CHEN Xin, LI Ai-qun, ZUO Xiao-bao, et al. Design and study on novel shape memory alloy isolator [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(6): 256-260.

(下转第 13 页)

